



문의 : 물리천문학부 제원호 교수 교수(02-880-6600) / 교신저자  
 김성수, 김도현(02-880-6120) / 공동 1저자  
 김종우, 안상민 / 공동저자  
 과학기술부/한국연구재단 리더연구자사업 지원

**자연대 제원호 교수 연구팀, 액체 표면장력의 곡률 의존성 첫 증명**  
*Physical Review X*에 논문 출판 (2018. 12.)

□ 내용

기체 상태의 수증기가 액체-물이 되는 상전이는 “nucleation” 이라는 과정에 의해 이루어진다. 그런데 nucleation 의 가장 첫 단계, 즉 수증기가 물이 된 첫 순간은 가장 중요한 순간임에도 불구하고 실험적으로 연구하기 어려웠다. 또한 이론적으로 이 critical nucleus는 거시적으로 유도된 열역학적 방정식인 켈빈 방정식으로 기술되어 왔는데 이 방정식을 나노미터 이하의 스케일에도 적용할 수 있을지는 오랫동안 논란이 되어왔다.

한편, 액체-기체 계면에서 표면장력이 계면의 곡률에 따라 달라진다는 사실은 70년 전에 이론적으로 증명되었다. 그러나 그 변화를 유의미하게 측정하려면 계면의 곡률반경이 수 나노 스케일까지 작아져야한다. 측정 방법과 장비의 한계로 이렇게 작은 스케일에 대한 직접적 연구는 오랫동안 이루어지지 못했다.

제원호 교수 연구팀은 자체 개발한 수정진동자와 나노크기 탐침이 결합된 원자힘 현미경을 이용하여 탐침과 바닥 표면 사이 수 나노미터 간격에 큰 음의 곡률을 가진 물기둥을 형성할 수 있었다. 연구팀은 이 원자힘 현미경으로 탐침과 바닥 표면사이에 물기둥이 형성되는 순간 두 표면사이의 거리를 측정하여 물기둥의 곡률을 구하고, 이를 기존에 있던 응결이론 (Kelvin equation)과 비교하여 차이를 발견했다. 그리고 이 이론과 실험결과의 차이가 표면장력의 곡률 의존성에 기인한다는 사실을 밝혔다. 이 연구는 거시적으로 유도된 열역학 이론이 1 나노 이하 영역까지 적용될 수 있다는 것을 보였고, 순수한 물이라도 액체-기체 계면이 큰 음의 곡률을 가지면 표면장력이 증가한다는 것을 실험적으로 발견했다. 본 연구는 분자 수준 차원에서 nucleation과 표면장력에 대한 이해를 심화하였으며, 구름이나 응결핵 생성 등 기상현상의 미시적 이해에도 기여할 수 있을 것이다. 이 연구는 한국연구재단 리더연구자사업 지원으로 이루어졌다.

[붙임] 1. 연구결과 2. 용어설명 3. 그림설명 4. 연구진 이력사항

## 연구 결과 및 의의

본 연구팀은 자체 개발한 수정진동자와 나노크기 탐침이 결합된 원자힘 현미경을 이용하여 친수성 탐침과 바닥 표면 사이 수 나노미터 간격에 큰 음의 곡률을 가진 물기둥을 형성하였다. 연구팀은 이 원자힘 현미경으로 탐침과 바닥 표면사이에 물기둥이 형성되는 순간 두 표면사이의 거리를 측정하여 물기둥의 곡률을 구하고, 이를 기존에 있던 응결이론(Kelvin equation)과 비교하여 차이를 발견했다. 그리고 이 이론과 실험결과의 차이가 표면장력의 곡률 의존성에 기인한다는 사실을 밝혔다.

이 연구는 거시적으로 유도된 열역학 이론이 1나노 이하 스케일까지 적용될 수 있다는 것을 보였고, 순수한 물이라도 액체-기체 계면이 큰 음의 곡률을 가지면 표면장력이 증가한다는 것을 실험적으로 발견했다. 큰 음의 곡률을 가질 때 물의 표면장력이 증가한다는 것은 기존에 예상했던 것 보다 더 낮은 습도에서, 더 넓은 틈에도 물이 액체 상태로 존재할 수 있다는 것을 의미하고 이것은 자연 구석구석에 물이 더 쉽게 생기고 존재하고 있을 것임을 암시한다.

본 연구는 근본적인 차원에서 nucleation과 표면장력에 대한 이해를 심화하였으며, 구름이나 응결핵 생성 등 기상현상의 미시적 이해에도 기여할 수 있을 것이다.

# 용어 설명

## 1. 응결 (Nucleation)

- 상전이에서 새로운 열역학적 상이 형성되는 과정, 상전이의 첫 번째 단계

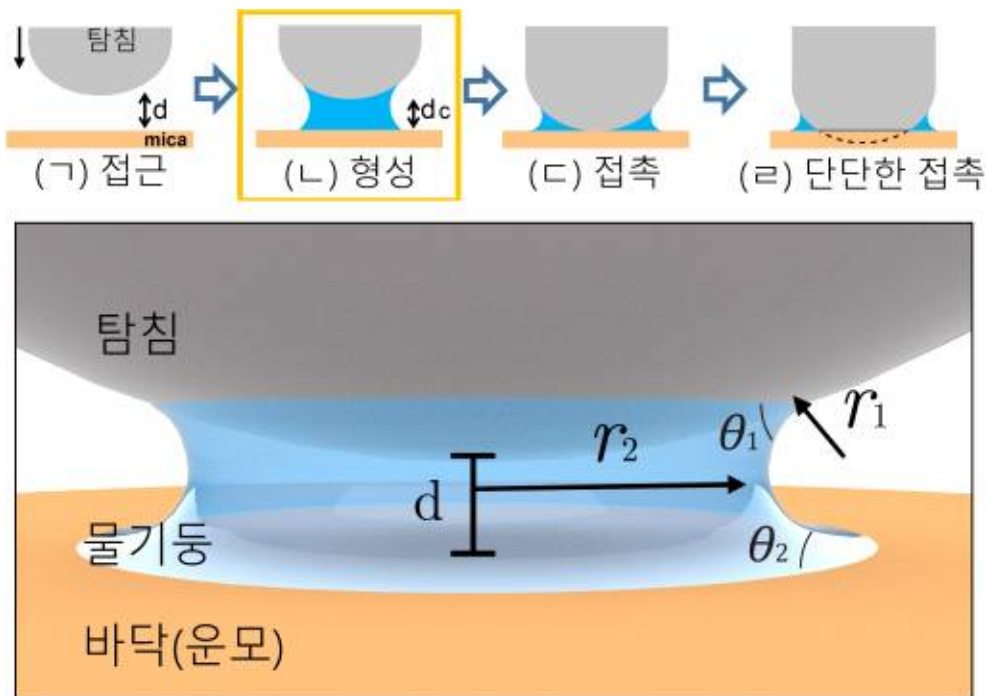
## 2. 켈빈 방정식 (Kelvin equation)

- 액체 방울이나 물기둥 표면 같이 구부러진 액체-기체 계면으로 인한 증기압의 변화를 기술한다. 볼록한 계면의 증기압은 평평한 면의 증기압 보다 높고, 오목한 계면에서는 증기압이 평평한 면에서 보다 낮다.

## 3. 응결핵 (Critical nucleus)

- nucleation으로 생긴 새로운 상의 첫 순간

# 그림 설명



위쪽 (가)~(ㄹ) 은 탐침과 바닥표면이 접근하여 물기둥을 형성하고 서로 단단히 접촉하기까지의 과정에 대한 모식도이다. 탐침과 바닥 표면이 가까이 접근하면 그 사이에 아래 그림과 같은 물기둥이 형성된다. 물기둥의 곡률은  $1/R = 1/r_1 + 1/r_2$  로 주어지는데  $r_1$ 이 오목하여 음수가 되기 때문에 물기둥은 큰 음의 곡률을 가지게 된다. 이때의 표면장력은 평평한 면의 표면장력보다 크다.

<출판 논문>

Seongsoo Kim, Dohyun Kim, Jongwoo Kim, Sangmin An, Wonho Jhe,  
“Direct Evidence for Curvature-Dependent Surface Tension in Capillary Condensation: Kelvin  
Equation at Molecular Scale”,  
***Physical Review X*** ()

# 연구책임자 이력사항 (제원호 교수)

## 1. 인적사항

- 소 속 : 서울대학교 자연과학대학 물리천문학부 교수
- 전 화 : 02-880-6600/ 010-7603-0691
- E-mail : whjhe@snu.ac.kr



## 2. 학력

- 1978.03-1982.02 서울대학교 물리학 학사
- 1982.03-1984.02 서울대학교 물리학 석사
- 1984.09-1989.05 미국 Yale 대학교 물리학 박사

## 3. 경력사항

1992 ~ present	서울대학교 물리천문학부	교수
1989 ~ 1992	Havard 대학교 박사후연구원	연구원
1997 ~ 2005	과학기술부 근접장광기술 창의연구단	단장
2007 ~ 2011	과학기술부/연구재단 나노액체연구 도약연구단	단장
2016 ~ 현재	과학기술부/연구재단 0차원 나노유체 리더연구단	단장
2012. 10	미국 물리학회	석학회원 (Fellow)
2006. 10	제51회 대한민국 학술원상(자연과학부문)	수상
2007. 6	국가연구개발 우수성과 100선(과학기술부)	수상
2006. 8	국가 최고 연구성과 50선(한국과학재단)	수상
2013. 2	성도광과학상(한국광학회)	수상
2015. 9	서울대학교 자연과학대학 우수강의상	수상
2013~현재	서울대학교 자연과학대학 응용물리연구소	소장
2015~현재	Scientific Reports (Nature Pub. Gr.)	Editorial Board
2016. 7	제25회 국제원자물리학회 조직위원장(코엑스, 2016)	위원장

## 4. 기타 정보

제1공동저자 공동연구원 김성수 연구조원, 현재 미국 하버드대학교 대학원생 (학부생 인턴 지도교수: 제원호)  
 제1공동저자 공동연구원 김도현 연구원, 현재 서울대학교 물리학 박사과정 대학원생 (지도교수: 제원호)  
 공저자 공동연구원 김중우 연구원, 현재 화학연구원 연구원 (박사과정 지도교수: 제원호)  
 공저자 공동연구원 안상민 교수, 현재 자연대 기초과학연구원 연구조교수 (박사과정 지도교수: 제원호)

\*과학기술부/한국연구재단 지원 리더과제연구단 연구원들임